

doi: 10.11720/wtyht.2023.0068

杨海,徐学义,熊盛青,等.凤太矿集区航空地球物理异常特征及找矿方向[J].物探与化探,2023,47(5):1157-1168.http://doi.org/10.11720/wtyht.2023.0068

Yang H, Xu X Y, Xiong S Q, et al. Aerogeophysical anomalies and prospecting direction in the Fengtai ore concentration area[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2023, 47(5): 1157-1168. http://doi.org/10.11720/wtyht.2023.0068

凤太矿集区航空地球物理异常特征及找矿方向

杨海^{1,2}, 徐学义^{1,3}, 熊盛青¹, 杨雪¹, 高卫宏⁴, 范正国¹, 贾志业¹

(1. 中国自然资源航空物探遥感中心, 北京 100083; 2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029; 3. 中国地质调查局, 北京 100037; 4. 宝鸡西北有色七一七总队有限公司, 陕西 宝鸡 721015)

摘要: 凤太矿集区是秦岭造山带中部重要的铅锌矿和金矿产地, 发育有铅硐山—东塘子、八方山—二里河、八卦庙、双王等多个大型—超大型矿床。随着矿床开发, 储量大幅度下降, 地表找矿也转入深部找矿, 但矿床赋存的地球物理场背景不清楚, 严重制约了矿床成矿规律研究及外围的找矿勘查工作。本文运用最新完成的 1:5 万航空物探(磁、放)数据, 结合重力数据, 开展区域、矿集区、矿床 3 个尺度的多源地球物理场特征研究, 旨在总结不同尺度地球物理异常分布规律, 为成矿规律研究和找矿预测提供依据。结果表明, 凤太矿集区与西成矿集区具有相似的磁性结构, 二者被徽成盆地结晶基底产生的强磁异常带所分隔。重力垂向一阶导数显示凤太、西成矿集区与徽成盆地具有相似的密度结构, 推断浅部为一个统一的盆地。2 个矿集区之间有一定的找矿空间。凤太矿集区发育大量 NW 向线性磁异常带, 与断裂构造的位置十分吻合, 受后期改造明显, 被 NE 向构造错断, 重力垂向二阶导数推断深部发育大量中酸性侵入岩株或岩脉。通过航磁垂向一阶导数、0° 方向水平导数、小波变换等方法可以有效识别构造边界, 矿体大都沿构造带呈 NW 向分布, 对找矿勘探有重要指导作用。

关键词: 凤太矿集区; 航磁异常; 航放异常; 多源地球物理; 找矿方向

中图分类号: P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2023)05-1157-12

0 引言

凤太矿集区西起凤县, 北至平木—靖口, 东到黄柏塬—二郎坝, 南至江口, 是一个东西长约 90 km、南北宽约 23 km; 面积约 2 000 km² 的菱形区域, 矿产地相对集中分布于西部。凤太矿集区位于秦岭成矿带中部, 地处秦岭多金属—贵金属成矿带中部, 成矿地质条件优越, 以往 500 m 以浅已累计查明铅锌资源量 550×10⁴ t, 金资源量 200 t, 属中国重要的铅锌金矿产地之一^[1-2]。很多研究学者从成矿地质环境、控矿特征、地球化学特征、矿床成因等方面入手, 对铅锌矿成因进行了深入研究, 主要争论的矿床成因类型有 3 种: 喷流—沉积型(SEDEX) 矿床^[3-6]、喷流沉积(SEDEX) —改造(再造) 型矿床^[7-20], 以及构

造—岩浆作用控制的后生热液充填矿床^[21-28]。成因认识的根本分歧主要在于铅锌矿床是同生的还是后生的。金矿的成因同样存在较大的争议, 如喷流—沉积改造型^[29-33]、卡林—类卡林型^[34-35] 还是造山型金矿^[36-43]。矿床成因认识不清楚, 将会极大的阻碍找矿勘探工作。

为了拓展凤太矿集区的找矿空间, 聚焦于覆盖区和深部找矿, 开展了一系列物探工作。王备战等^[44] 运用航磁、广域电磁法、瞬变电磁法、短偏移距瞬变电磁法等对矿床的深部进行了找矿预测, 指出矿床深部以及边部的次级背斜找矿潜力较大。范剑等^[45] 对凤太矿集区西部的地面磁测数据进行了解释, 圈定了 17 个局部异常。随着近 20 年的铅锌矿业开发及矿山产能的不断增加, 铅锌资源消耗迅猛,

收稿日期: 2023-02-15; 修回日期: 2023-04-16

基金项目: 国家自然科学基金地质联合基金“青藏高原东北缘多地球物理耦合场深部特征与浅部响应”(U2244220); 中国地质调查局项目“秦岭—大别造山带航空物探遥感调查”(DD20190351)、“重点地区铜多金属矿航空物探遥感调查”(DD20230351)

第一作者: 杨海(1987-), 男, 博士研究生, 高级工程师, 从事航空物探数据处理及综合解释工作。Email: yanghai@mail.cgs.gov.cn

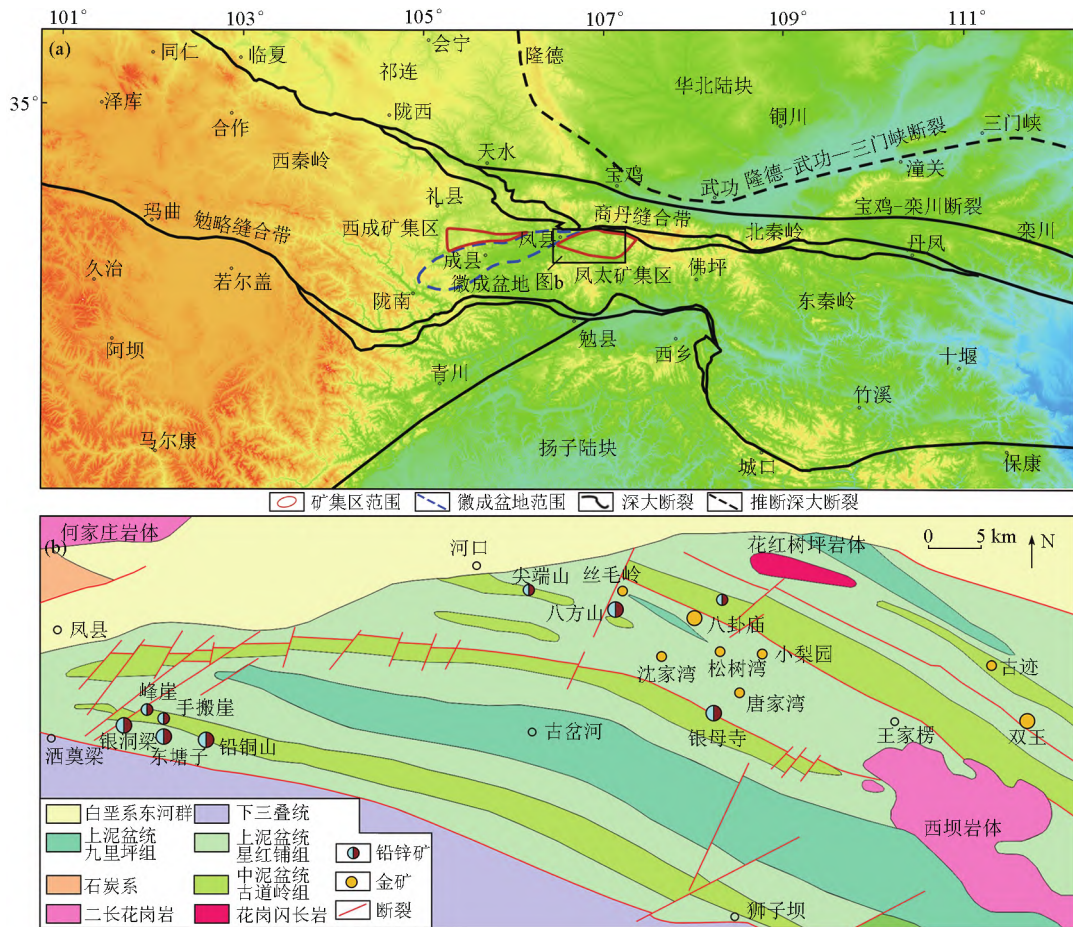
区内大中型矿山保有储量加速下滑,即将面临资源枯竭的困境。然而,该地区地质构造复杂,植被覆盖厚,地面工作开展难度极大,区域性地球物理资料缺乏,制约了成矿规律研究和深部找矿。2015~2016年,地质调查工作部署在该区开展了大面积1:5万航空磁、放调查,基本覆盖了西成和凤太矿集区。本文基于最新完成的航空磁、放调查数据,结合地面重力数据,开展了区域、矿集区、矿床3个尺度的地球物理场信息提取,对凤太矿集区的控矿构造及深部结构进行了分析,旨在梳理区域地球物理场背景,为凤太矿集区矿床成矿规律研究和找矿预测提供新的依据。

1 区域地质概况

凤太矿集区位于秦岭造山带中部,与西成矿集区共同构成秦岭造山带铅锌金成矿带的重要组成部分^[26,40-41,46],二者中间被徽成盆地所分隔(图1a)。

凤太矿集区北以商丹缝合带与北秦岭叠瓦逆冲推覆构造带接壤,南为南秦岭南部晚古生代隆升带。矿集区北部以湘子河—黄柏塬断裂为界,是商丹缝合带的组成部分,南部以酒奠梁—江口断裂为界,西以凤县—太白—石峡断裂与西成矿集区相隔。矿集区内断裂多呈NWW向展布,局部亦有近EW向及NEE向构造,部分断裂具有同生断裂性质,直接控制了区内矿产的分布^[47]。

矿集区内主要出露中—上泥盆统地层(图1b),为一套低绿片岩相浅变质滨—浅海相碎屑岩—碳酸盐岩建造。中泥盆统古道岭组为深灰色中厚层—块状结晶灰岩、生物碎屑灰岩;上泥盆统星红铺组为炭质千枚岩、钙质千枚岩、铁白云质千枚岩、绿泥石千枚岩、粉砂质千枚岩夹粉砂岩、薄层灰岩;中泥盆统古道岭组灰岩与上泥盆统星红铺千枚岩的过渡层、含碳部位是矿集区铅锌矿床的主要赋矿层位。矿集区内普遍发育印支期岩浆岩,主要有NW向呈岩基产出的西坝岩体,其岩性为花岗闪长岩、石英闪长



a—秦岭造山带构造; b—凤太矿集区地质^[26,44]

a—tectonic framework of Qinling orogenic belt; b—geological map of Fengtai ore concentration area^[26,44]

图1 研究区地质概况

Fig.1 The geological background of the study area

岩、二长花岗岩,以及 NW 向呈小岩株产出的花红树坪花岗闪长岩体,这 2 个岩体展布于矿集区的中部,与区内主构造线方向基本一致。

在秦岭造山带演化的碰撞晚期至后碰撞阶段,凤太矿集区形成了由一系列 NWW 向复式褶皱、脆韧性剪切带、断裂和节理,以及 NNE 向和 NE 向断裂和节理组成的一个大型压扭性走滑双重构造变形系统^[21,23]。褶皱构造与 NW—NWW 向断裂组成一系列褶断带,直接控制了区内矿产的分布,形成了南北 2 条矿带,即北部的八方山—八卦庙—银母寺铜铅锌金矿带和南部的铅硐山—水柏沟铅锌(铜)矿带^[47]。如铅硐山次级背斜控制着东塘子—铅硐山铅锌矿床,八方山—二里河大型铅锌矿床、尖端山小型铅锌矿床产于尖端山—八方山次级背斜鞍部及北倒转翼,白杨沟、柳树沟铅锌矿产于白杨沟—柳树沟次级背斜倾伏部位,八卦庙金矿受控于长沟—八卦庙向斜,丝毛岭金矿产于丝毛岭—松树湾向斜北翼^[47-48]。

2 数据处理方法

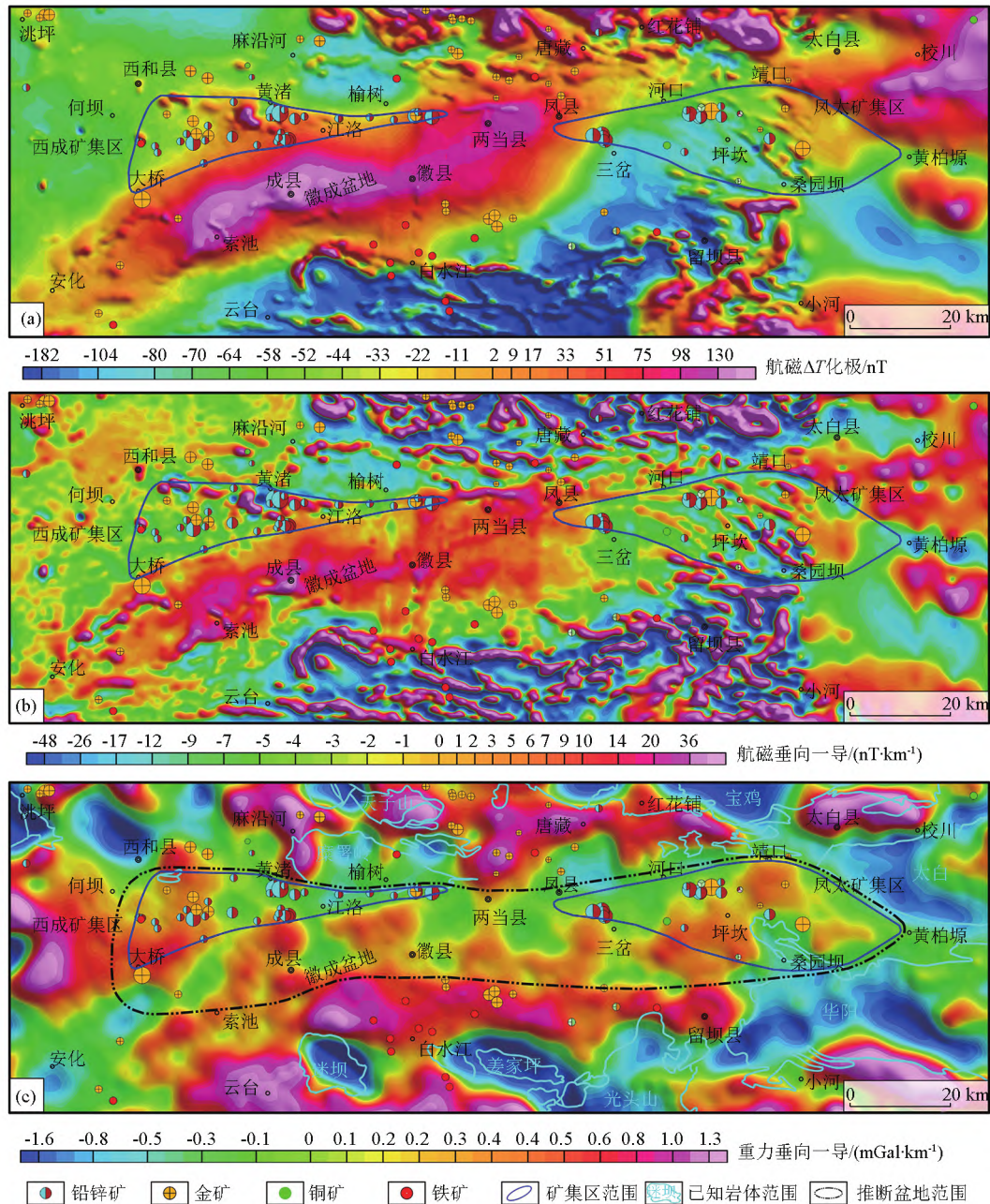
本次研究采用 1:5 万实测航空磁、放数据,综合 1:50 万汇编重力数据,对凤太矿集区地球物理场特征进行研究。航磁数据主要用于研究构造—岩浆活动引起的磁性差异与成矿的关系。航放数据主要显示地层放射性变化,对控矿地层分布有显示作用。重力数据主要进行了垂向一阶导数和二阶导数处理,压制了区域重力场的影响,突出了浅部地质体的密度变化,由于中酸性岩体的密度相比于地层偏低,通常可以反映中酸性岩体的分布范围。由于凤太矿集区以弱缓磁异常为主,尤其是控矿构造呈 NW 向线性弱磁异常带,为了获得深浅不同层次的构造信息,主要开展了区域、矿集区、矿床 3 个尺度的数据处理,区域磁场数据为了衔接不同比例尺的数据,采用 500 m×500 m 网格间距,矿集区采用 100 m×100 m 网格间距,矿床尺度仍然采用 100 m×100 m 网格间距,但由于数据尺度为 1:5 万,研究范围越小受测线效应影响越大,故采用去条带滤波和精细调平等方法对数据进行处理,大大提高了构造细节的显示。同时,为了提取控矿构造细节,对磁异常信息进行了垂向一阶导数、0°方向水平导数、小波变换等处理。小波变换采用频率域德比契斯(Daubechies)小波变换算法实现剖面测线位场数据的带通滤波计算,主要提取高频信息,反映浅部构造特征。以上数据处理均采用中国自然资源航空物探遥感中心自主研发的 Geoprobe 3.0 完成。

3 区域地球物理场特征

从航磁 ΔT 化极磁异常来看(图 2a),凤太矿集区和西成矿集区都呈现出弱磁场的特征,显示盆地的基底和盖层以无磁性或弱磁性为主,局部构造—岩浆活动形成了局部高磁异常。经垂向一阶导数对构造信息进行增强(图 2b),凤太矿集区出现了大量 NW 向的磁异常带,与区域构造线一致,而西成矿集区在北部呈现近 EW 向的磁异常带,都显示了构造—岩浆活动引起的磁异常变化特征,并且凤太矿集区受后期构造活动的改造要强于西成矿集区。二者被徽成盆地 NE 向磁异常带所分隔,该磁异常的形成时代可能早于泥盆纪盆地,推断是扬子陆块西北缘早期的构造—岩浆岩带。通过布格重力垂向一阶导数可以看出(图 2c),西成矿集区、凤太矿集区没有出现大规模的重力低异常,与周围出露中酸性岩体呈现的重力低异常明显不同,说明 2 个矿集区没有大规模的花岗岩岩体侵入。并且,西成、凤太矿集区和徽成盆地的重力垂向一阶导数异常特征相似,推断三者浅部的密度变化不大,可能在浅部是连为一体的盆地。因此,区域地球物理场特征显示西成矿集区和凤太矿集区以弱磁性基底为主,徽成盆地以强磁性基底为主,在基底之上发育了统一的沉积盖层。西成和凤太矿集区都具有构造—岩浆活动引起的线性磁异常特征。

4 矿集区地球物理场特征

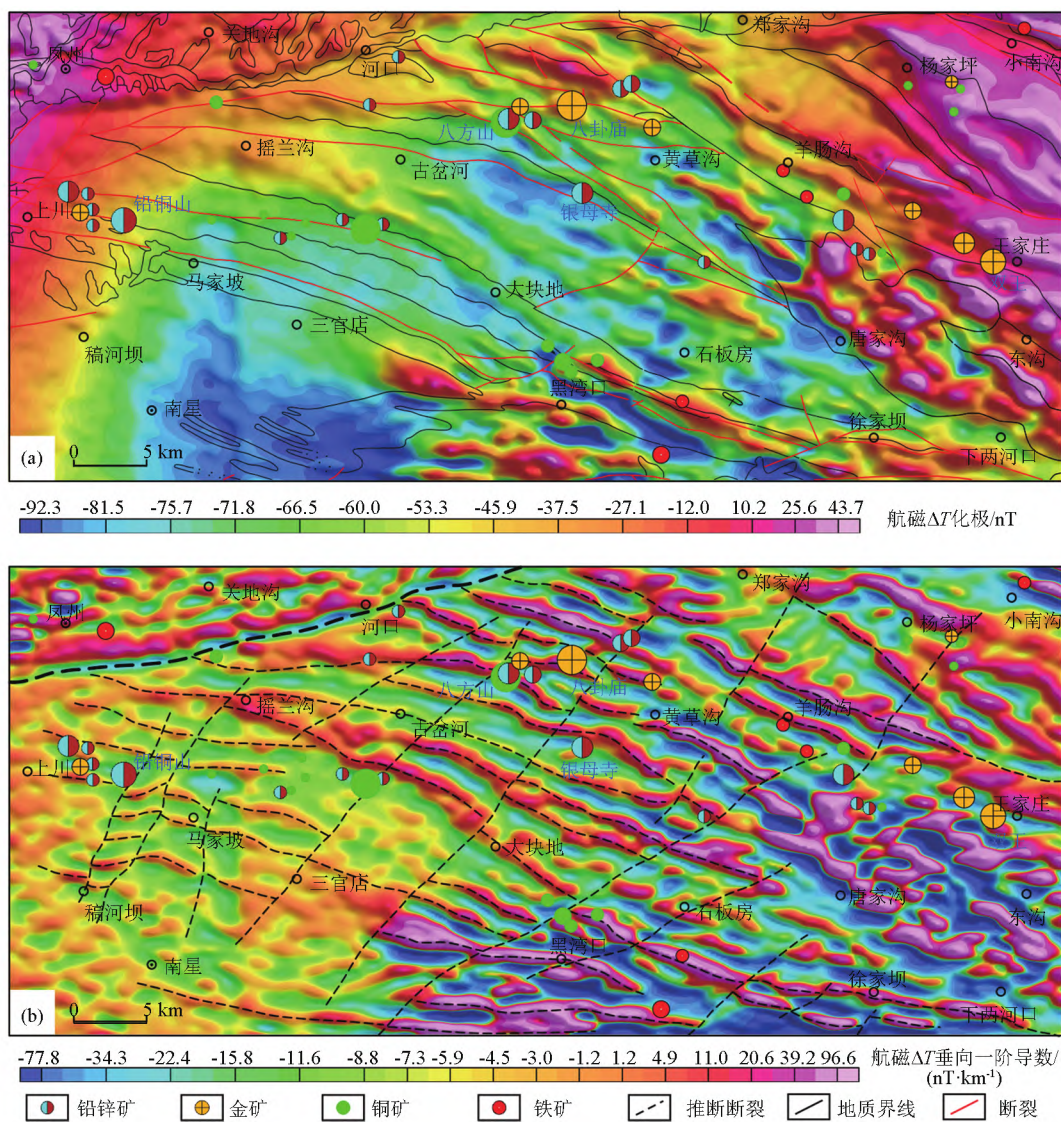
为了有效提取凤太矿集区的构造特征,对矿集区的数据进行了重新处理,主要是缩小成图范围和网格化间距,突出了弱磁异常的特征。航磁化极异常显示(图 3a),凤太矿集区的构造格架十分清晰,内部主要以大量 NW 向线性弱磁异常带为主,在南部石炭系、二叠系和三叠系地层也有分布。磁异常走向与背斜轴向一致,且与广泛分布的花岗斑岩脉、石英脉、伟晶岩脉走向一致。航磁垂向一阶导数突出了矿集区内高频磁异常的变化(图 3b),压制了区域性磁异常的影响,磁异常条带很好地反映了断裂构造的走向。可以看出,矿集区构造变形十分强烈,总体构造呈 NW 向,向西逐渐转换为近 EW 向,最终受控于 NE 向凤县—太白断裂。区内主要发育 2 组构造,主体为 NW 向构造,是热液活动的主要通道,后期受 NE 向构造破坏,使大量 NW 向线性磁异常带错断为“香肠状”。如此平行规律分布的磁异常



带,推断是由沿断褶带广泛发育的岩浆—热液活动所造成。

为了分析凤太矿集区内密度的变化,对重力异常进行了垂向二阶导数(图4),除西坝岩体显示重力低的特征,在矿集区西北沿凤县—太白断裂出露的大量中酸性岩体均显示了重力低的特征,应在深部有较大规模的岩体。在矿集区内部黄草沟、黑湾口、摇篮沟、马家坡等地可能局部存在花岗岩岩枝或岩脉,显示规模较小的重力低。航放异常可以对地

层不同岩组进行识别(图5),可以看出古道岭组呈现出明显的低钾特征。银洞梁—铅硐山矿田和八方山—二里河矿田均位于钾元素弱异常带的边部,显示了岩性边界的特征。已知的谭家山—铅硐山—铜牌沟和梯子崖—银母寺—大黑沟复背斜均位于钾低异常带,可能与背斜核部地层钾元素含量较低有关。因此,钾元素低值异常带可能代表了背斜的核部,异常梯度带代表了岩性边界,应关注低值异常带及其边部,对区域找矿有指导意义。



a—凤太矿集区航磁 ΔT 化极异常; b—凤太矿集区航磁垂向一阶导数与推断断裂分布

a—aeromagnetic ΔT RTP anomaly of Fengtai ore concentration area; b—vertical first order derivative of RTP aeromagnetic ΔT anomaly and inferred fault in Fengtai ore concentration area

图 3 凤太矿集区航磁异常特征

Fig.3 Aeromagnetic anomaly feature of Fengtai ore concentration area

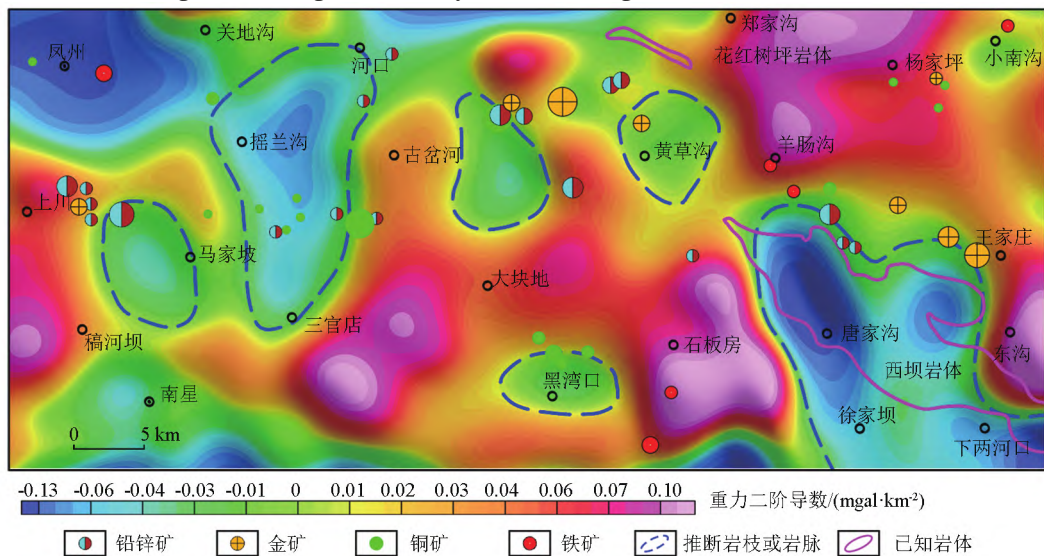


图 4 凤太矿集区重力垂向二阶导数图与推断岩体分布

Fig.4 Vertical second order derivative of Bouguer gravity anomaly and inferred magmatic rock in Fengtai ore concentration area

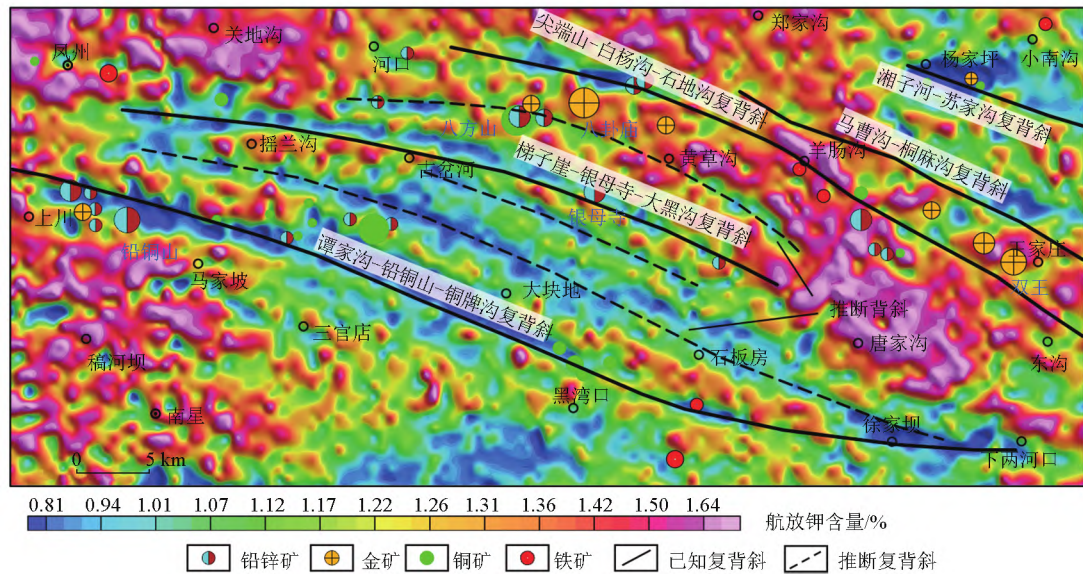


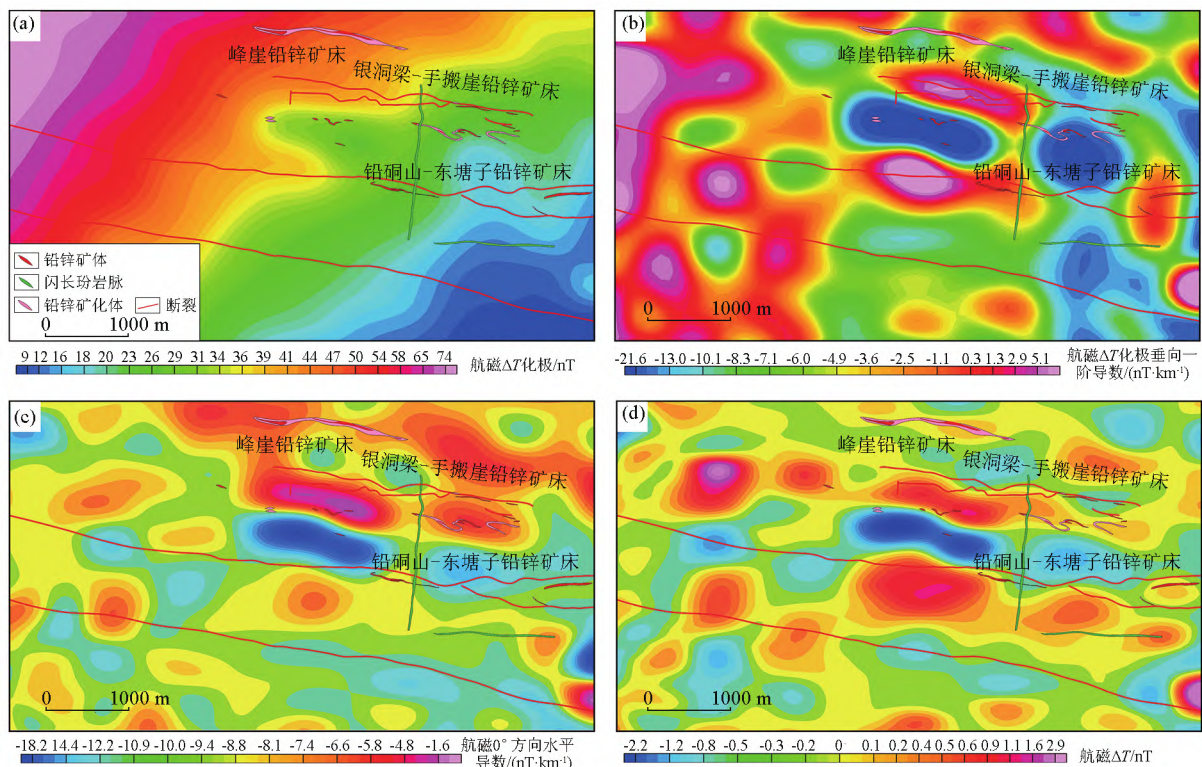
图5 凤太矿集区航放钾含量与复背斜分布

Fig.5 Airborn radioactive Kalium content and anticlinorium in Fengtai ore concentration area

5 矿床地球物理场特征

为了获得航磁异常与矿体的分布关系,对东塘

子地区的航磁数据进行了精细处理,提取了控矿构造的特征。在航磁 ΔT 化极异常上(图6a),由于区域磁异常的影响,弱化了控矿构造特征,矿体的分布与磁异常并没有明显的相关性。在垂向一阶导数上

a—航磁 ΔT 化极异常;b—航磁 ΔT 化极垂向一阶导数;c—航磁 ΔT 化极 0° 方向水平导数;d—航磁 ΔT 小波变换

a—reduction to pole of aeromagnetic ΔT anomaly map; b—vertical first order derivative of RTP aeromagnetic ΔT anomaly map; c— 0° direction derivative of RTP aeromagnetic ΔT anomaly map; d—wavelet transform of aeromagnetic ΔT anomaly map

图6 东塘子地区航磁异常特征与矿体分布

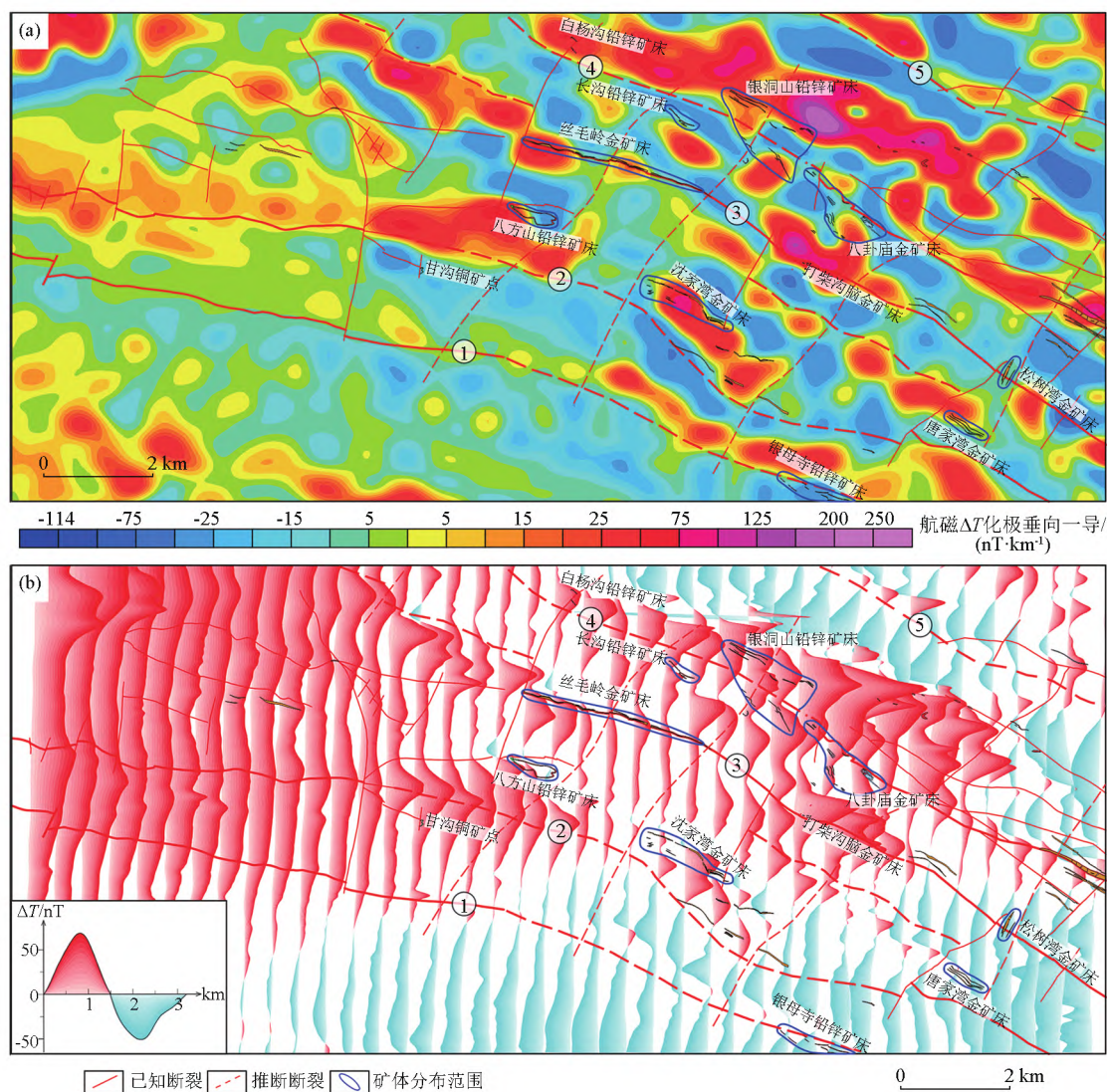
Fig.6 Aeromagnetic anomaly feature and distribution of orebodies in Dongtangzi area

(图 6b), 局部构造得到了增强, 东塘子地区主要分布有 3 条 NW 向规模较大的构造带, 峰崖、银洞梁—手搬崖和铅硐山—东塘子矿体大都沿磁异常及其边缘梯度带分布, 东塘子—铅硐山磁异常带向东被 NE 向构造错断。为了消除高频信号提取带来的测线效应的影响, 开展了 x 方向导数和小波变换(图 6c、d), 结果更清晰地显示了 NW 向控矿构造的特征。

从岩石物性特征来看, 该区岩石以弱磁性为主(见表 1), 矿体上盘主要为含炭粉砂质千枚岩, 磁化率为 $(18 \sim 21) \times 10^{-5} \text{SI}$, 下盘以含炭生物微晶灰岩等为主, 磁化率为 $2 \times 10^{-5} \text{SI}$ 。矿石以块状和浸染状铅锌矿石为主, 磁化率较围岩偏高, 尤其是硅化和黑云母化的矿石较高, 为 $(32 \sim 106) \times 10^{-5} \text{SI}$ 。这也是该区矿体均沿着弱磁异常带分布的主要原因, 应重视

弱异常信息的提取。沿构造发育强烈的岩浆热液活动, 使矿体及其蚀变带具有弱磁性, 而围岩是千枚岩和板岩, 几乎无磁性。高精度航磁通过对构造带的识别, 对指导找矿勘查有重要意义。

八方山—八卦庙地区的磁异常特征更加复杂, 垂向一阶导数上显示主要存在 5 条 NW 向的异常带(图 7a), 表现为带状或串珠状磁异常, 包括①小白崖—银母寺异常带、②二道峡—八方山—沈家湾异常带、③高家山—丝毛岭—松树湾异常带、④白杨沟—银洞山—八卦庙异常带、⑤树沟异常带。异常带显示了沿构造带的热液活动引起的磁异常变化, 主要分布有 NW 和 NE 两组构造, NW 向构造为主要的容矿构造, 矿体大都呈 NW 向展布, NE 向构造为破坏构造, 将 NW 向构造错断为串珠状或香肠状, 例



a—航磁 ΔT 化极垂向一阶导数异常; b—航磁 ΔT 剖面

a—vertical first order derivative of RTP aeromagnetic ΔT anomaly map; b—aeromagnetic ΔT profile map

图 7 八方山—八卦庙地区航磁异常特征与矿体分布

Fig.7 Aeromagnetic anomaly feature and distribution of orebodies in Bafangshan-Baguamiao area

表 1 铅硐山—东塘子矿床矿体与围岩磁化率
Table 1 Magnetic susceptibility of ore body and wall rock
in Qiantongshan-Dongtangzi deposit

名称	特征	磁化率/ 10^{-5} SI		
		最小值	最大值	平均值
含炭粉砂质千枚岩	矿体上盘	11	24	18
含炭粉砂质千枚岩	矿体上盘	12	28	21
含炭生物微晶灰岩	矿体下盘	1	5	2
含炭生物微晶灰岩	矿体下盘	1	4	2
铅锌矿石		19	47	32
铅锌矿石	绢云母化	10	61	37
铅锌矿石	硅化	59	175	106

如丝毛岭金矿向西含矿构造明显向北错动。在剖面上(图 7b) 矿体大都位于磁异常的梯度带上,且在多条测线上有反应,显示了构造控矿的特征,如八方山、八卦庙、长沟、银母寺等。

6 找矿远景预测

近年来,在西成矿集区东部发现了郭家沟等大型矿床,能否在凤太矿集区也有所突破是关注的焦点。通过对地球物理资料的系统梳理,可以回答两个层次的问题。区域尺度来看,西成矿集区、凤太矿集区和徽成盆地在磁异常上有一些差别,三者在基底结构上存在差异,但重力垂向一阶导数异常特征相似,说明浅部的密度变化不大,具有相似的沉积盖层且不发育大规模的中酸性侵入岩。凤太矿集区西部的构造逐渐转为近 EW 向,与西城矿集区相似,说明 2 个矿集区之间还有较大的找矿空间,需要重点关注徽成盆地之下泥盆系地层的分布范围及埋深。应该重点关注 3 个方面的找矿标志,包括①NW 向磁异常边缘梯度带;②航放钾元素低异常带边缘;③重力垂向二阶导数推断隐伏岩体与围岩的接触带。

矿床尺度来看,大比例尺的航磁异常特征能够显示更多的控矿构造细节,凤太矿集区发育大量的 NW 向的磁异常带,值得开展地面验证工作,尤其是在已有矿床外围,构造延伸方向上加大攻关力度,以求取得突破。在东塘子地区,峰崖、银洞梁—手搬崖、铅硐山—东塘子 3 条铅锌矿带明显沿磁异常带分布,显示了良好的找矿前景,沿构造走向圈出了 5 个远景区。铅硐山—东塘子矿带向西应该还有较大的找矿空间,向东磁异常被错断,可能矿体会有错位,矿床东部的磁异常向南错动,需要加强地面验

证。银洞梁—手搬崖矿带向西有较大工作空间。峰崖铅锌矿带向东、西两侧均有较大找矿工作空间(图 8a)。在八方山—八卦庙地区,磁异常的分布特征勾勒出了控矿的构造格架,NW 向构造带沿走向延伸较大,局部被 NE 向构造错断,基本上控制了矿体的产出,根据构造带的展布特征初步圈出了 6 个远景区(图 8b)。I 号远景区主要位于银洞山和白杨沟铅锌矿之间,NW 向构造分布连续。II、IV 和 V 号远景区位于丝毛岭金矿的东、西延伸方向,控矿构造被 NE 向构造错断。III 号远景区位于八方山铅锌矿床向西构造延伸方向,构造呈近 EW 向。VI 号远景区位于银母寺铅锌矿带向西延伸方向。以上预测区基于控矿构造的展布细节划分,旨在为找矿部署提供依据,在实际工作中应结合大比例尺物化探资料进一步分析。

7 结论

1) 凤太矿集区从区域磁场特征来看,属于弱磁性地区,反映了沉积盆地的特征,通过信息增强获得大量平行分布的 NW 向弱磁异常带,被 NE 向断裂错断为“香肠状”,这种磁场面貌保留了岩浆—热液活动以及后期构造变形的痕迹。重力垂向二阶导数也显示深部可能存在大量的岩枝或岩脉。从区域地球物理场特征来看,符合构造—岩浆作用控制的后生热液充填成矿的特点。

2) 通过区域、矿集区、矿床 3 个尺度的数据处理,可以获得 2 个重要认识:一是凤太矿集区向西延伸至徽成盆地浅覆盖区有很好的找矿空间,需要加强泥盆系的分布范围、埋深以及构造分布的研究;二是针对东塘子、八方山—八卦庙地区,提取的线性磁异常很好地显示了控矿构造的分布特征,应在已有矿床外围加大验证力度,以期获得找矿的突破。

3) 在弱磁异常地区,不同尺度、不同比例尺磁异常对成矿要素的显示是不一样的,仅关注磁总场难以对构造进行详细的解析,需要开展多维、多尺度的数据处理,提取不同的信息,为找矿提供指导。研究表明,1:5 万比例尺仍然偏小,属于成矿地质背景调查,难以精细刻画控矿构造的展布,应开展 1:2.5 万以上比例尺的航磁工作并加强弱磁信息的提取,结合重力和航放异常开展成矿预测。

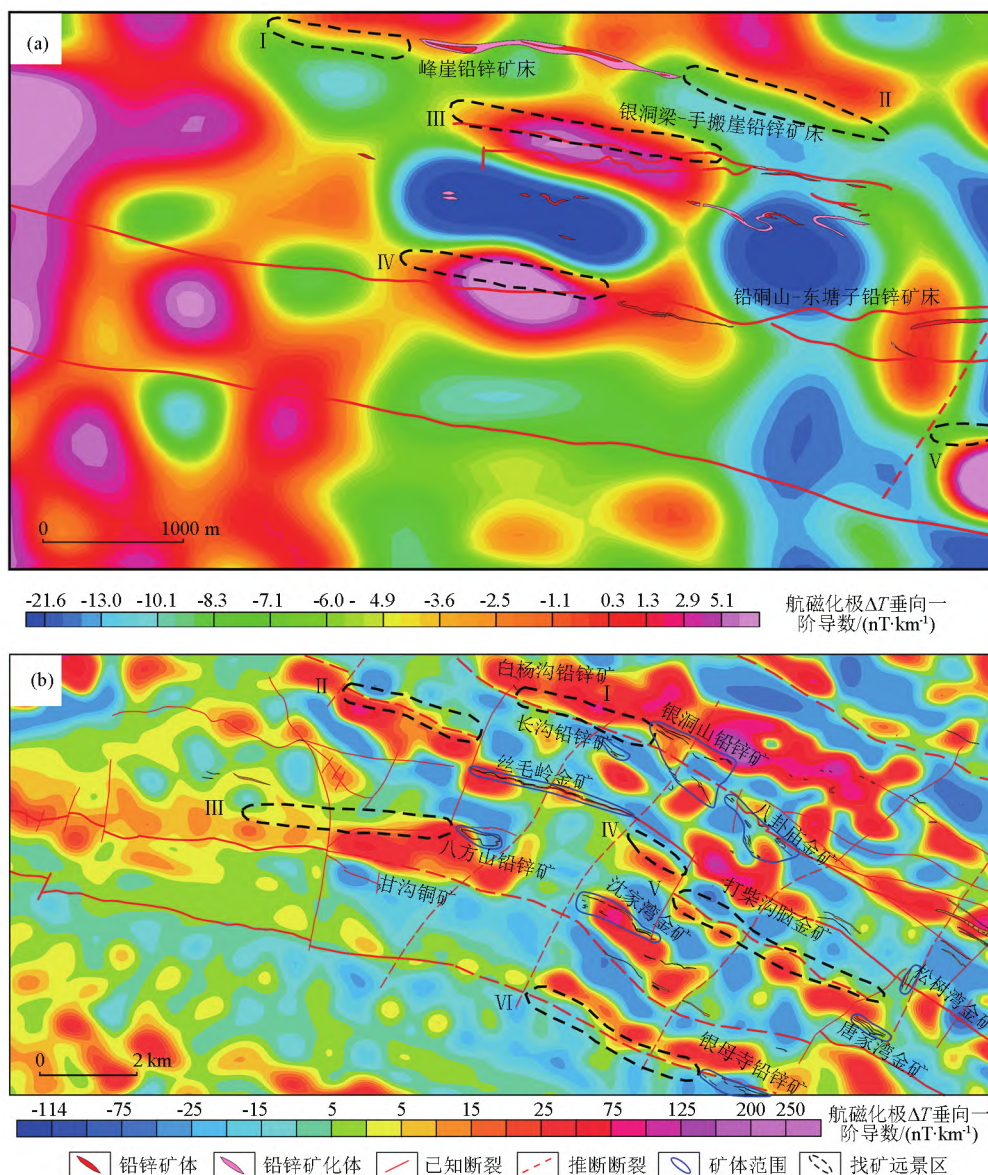


图 8 东塘子地区 (a) 和八方山—八卦庙地区 (b) 找矿远景预测

Fig.8 Prospecting direction of Dongtangzi area (a) and Bafangshan-baguamiao area (b)

参考文献 (References):

- [1] 王瑞廷, 王涛, 高章鉴, 等. 凤—太金属矿集区主要金属矿床成矿系列与找矿方向[J]. 西北地质, 2007, 40(2): 77-84.
Wang R T, Wang T, Gao Z J et al. The main metal deposits metallogenetic series and exploration direction in Fengtai ore cluster region, Shaanxi Province[J]. Northwestern Geology, 2007, 40(2): 77-84.
- [2] 李建华. 陕西凤太地区“八卦庙式”金矿控矿因素及其找矿潜力分析[J]. 矿产与地质, 2008, 22(1): 62-64.
Li J H. Analysis on ore-controlling factors and prospecting potential of the Baguamiao-type gold deposits in Fengtai area, Shaanxi[J]. Mineral Resources and Geology, 2008, 22(1): 62-64.
- [3] 戴问天. 层控铅锌矿中两类矿化的成因及相互关系——以陕南八方山为例[J]. 地质找矿论丛, 1989, 4(1): 14-21.
Dai W T. Geology relationship and genesis of two type of mineralization in Bafangshan Pb-Zn deposit [J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 1989, 4(1): 14-21.
- [4] 祁思敬, 李英. 南秦岭晚古生代海底喷气—沉积成矿系统[J]. 地质前缘, 1999, 6(1): 171-179.
Qi S J, Li Y. The Upper Paleozoic submarine exhalative-sedimentary metallogenetic system in South Qinling[J]. Earth Science Frontiers, 1999, 6(1): 171-179.
- [5] 薛春纪, 马国良, 隗合明, 等. 南秦岭主要类型热水沉积岩的 REE 地球化学[J]. 西安地质学院学报, 1996, 18(3): 21-28.
Xue C J, Ma G L, Wei H M et al. REE geochemistry of main types of hydrothermal sedimentary rocks in South Qinling[J]. Journal of Xi'an College of Geology, 1996, 18(3): 21-28.
- [6] 刘红涛, 底青云, 薛国强, 等. 陕西凤太地区铅锌矿床关键控矿要素探讨[J]. 地质与勘探, 2018, 54(4): 902-916.
Liu H T, Di Q Y, Xue G Q et al. Discussion on the ore-controlling factors of lead-zinc deposits in the Fengtai area, Shaanxi Province [J]. Geology and Exploration, 2018, 54(5): 902-916.
- [7] 张复新, 王俊发. 陕西秦岭地区泥盆系同生断裂、岩相与海底喷

- 流铅锌矿床[J].矿床地质,1991,10(3):217-231.
- Zhang F X,Wang J F.Devonian syngenetic faults and lithofacies in relation to submarine exhalative sedimentary lead-zinc deposits in Qinling area,Shaanxi Province[J].Mineral Deposit,1991,10(3):217-231.
- [8] 王集磊,何伯堃,李健中,等.中国秦岭型铅锌矿床[M].北京:地质出版社,1996.
- Wang J L,He B B,Li J Z,et al.Qinling-type lead-zinc ore deposits in China[M].Beijing:Geological Publishing House,1996.
- [9] 方维萱.秦岭造山带泥盆纪构造热水沉积成矿盆地与流体成岩成矿特征及其演化规律[D].西安:西北大学地质学系,1999.
- Fang W X.The evolutions and characteristic of ore-forming fluid and tectonic basin with hydrothermal sedimentary mineralization in the Devonian in the Qinling orogen,China[D].Xi'an:Department of Geology in Northwest University,1999.
- [10] 贾润辛,韩述山,魏合明.秦岭凤太矿田金矿成矿特征及成因分析[J].西安工程学院学报,1999,21(4):67-75.
- Jia R X,Han S S,Wei H M.Main metallogenic characteristics and genetic analysis of gold deposit in Fengtai ore field,Qinling[J].Journal of Xi'an Engineering University,1999,21(4):67-75.
- [11] 李建华.凤太矿田铜矿找矿潜力分析及靶区优选[J].有色金属矿产与勘查,1999,8(1):5-9.
- Li J H.Ore-searching potential of copper deposit and target selection in the Fengtai Ore Field[J].Geological Exploration for Non-Ferrous Metals,1999,8(1):5-9.
- [12] 刘方杰.秦岭泥盆纪凤太矿集区热水沉积金—多金属矿石建造的成矿建造分析及成矿模式研究[D].西安:西北大学,2001.
- Liu F J.The minerotect analysis and metallogenetic mode studying of the hydrothermal sedimentation gold-polymetal ore formation in Fengtai mine gather region in the devonian in Qinling orogeny[D].Xi'an:Northwest University,2001.
- [13] 姚书振,丁振举,周宗桂,等.秦岭造山带金属成矿系统[J].地球科学,2002,27(5):599-604.
- Yao S Z,Ding Z J,Zhou Z G,et al.Metallogenic systems of Qinling Orogen[J].Journal of Earth Science,2002,27(5):599-604.
- [14] 齐文,侯满堂.陕西铅锌矿类型及其找矿方向[J].陕西地质,2005,23(2):1-20.
- Qi W,Hou M T.Types and prospecting trend of lead and zinc ores in Shaanxi Province[J].Geology of Shaanxi,2005,23(2):1-20.
- [15] 李强,王兵岐,马治国,等.南秦岭凤太盆地金矿与铅锌矿的成矿模式[J].地球科学与环境学报,2007,29(1):15-21.
- Li Q,Wang B Q,Ma Z G,et al.Space-time relationship of gold deposit to lead-zinc deposit in Fengtai ore field in South Qinling[J].Journal of Earth Sciences and Environment,2007,29(1):15-21.
- [16] 王瑞廷,王涛,高章鉴,等.凤太多金属矿集区主要金属矿床成矿系列与找矿方向[J].西北地质,2007,40(2):77-84.
- Wang R T,Wang T,Gao Z Z,et al.The main metal deposits metallogenetic series and exploration direction in Fengtai ore cluster region,Shaanxi Province[J].Western Geology,2007,40(2):77-84.
- [17] 何进忠,姚书振,彭德启,等.西秦岭地区生物礁与铅锌矿关系的再认识[J].地球学报,2008,29(1):61-71.
- He J Z,Yao S Z,Peng D Q,et al.Reconsideration of the relationship between organic reef and lead-zinc deposits in West Qinling[J].Acta Geoscientica Sinica,2008,29(1):61-71.
- [18] 李红中,周永章,杨志军,等.秦岭造山带西段八方山—二里河地区硅质岩的地球化学特征及其地质意义[J].岩石学报,2009,25(11):3094-3102.
- Li H Z,Zhou Y Z,Yang Z J,et al.Geochemical characteristics and their geological implications of cherts from Bafangshan-Erlihe area in western Qinling orogen[J].Acta Petrologica Sinica,2009,25(11):3094-3102.
- [19] 李厚民,王登红,张长青,等.陕西几类重要铅锌矿床的矿物微量元素和稀土元素特征[J].矿床地质,2009,28(4):434-448.
- Li H M,Wang D H,Zhang C Q,et al.Characteristics of trace and rare earth elements in minerals from some typical lead-zinc deposits of Shaanxi Province[J].Mineral Deposits,2009,28(4):434-448.
- [20] 王东生,王瑞廷,代军治,等.秦岭造山带金属矿床的“二元控矿”特征[J].地质学报,2009,83(11):1719-1729.
- Wang D S,Wang R T,Dai J Z,et al.“Dual ore-controlling factors” characteristics of metallic deposits in the Qinling Orogenic Belt[J].Acta Geologica Sinica,2009,83(11):1719-1729.
- [21] 王义天,陈绍聪,胡乔青,等.陕西凤太矿集区多金属成矿作用的构造控制[J].岩石学报,2018,34(7):1959-1976.
- Wang Y T,Chen S C,Hu Q Q,et al.Tectonic controls on polymetallic mineralization in the Fengtai ore cluster zone,western Qinling,Shannxi Province[J].Acta Petrologica Sinica,2018,34(7):1959-1976.
- [22] 王义天,胡乔青,王瑞廷,等.陕西凤太矿集区铅锌矿床的成矿模型及其找矿意义[J].矿床地质,2020,39(4):587-606.
- Wang Y T,Hu Q Q,Wang R T,et al.A new metallogenetic model and its significance in search for Zn-Pb deposits in Fengtai polymetallic ore concentration area,Shannxi Province[J].Mineral Deposit,2020,39(4):587-606.
- [23] 王义天,毛景文,胡乔青,等.西秦岭西成和凤太矿集区三叠纪多金属成矿作用特征、规律及找矿方向[J].地球科学与环境学报,2021,43(3):409-435.
- Wang Y T,Mao J W,Hu Q Q,et al.Characteristics and metallogeny of Triassic polymetallic mineralization in Xicheng and Fengtai ore cluster zones,West Qinling,China and Their implications for prospecting targets[J].Journal of Earth Sciences and Environment,2021,43(3):409-435.
- [24] 胡乔青,王义天,王瑞廷,等.陕西省凤太矿集区二里河铅锌矿床的成矿时代:来自闪锌矿 Rb-Sr 同位素年龄的证据[J].岩石学报,2012,28(1):258-266.
- Hu Q Q,Wang Y T,Wang R T,et al.Ore-forming time of the Erlihe Pb-Zn deposit in the Fengtai ore concentration area,Shaanxi Province: Evidence from the Rb-Sr isotopic dating of sphalerites[J].Acta Petrologica Sinica,2012,28(1):258-266.
- [25] 胡乔青,王义天,王瑞廷,等.西秦岭凤太矿集区八方山—二里河铅(铜)矿床成矿地质特征与矿床成因探讨[J].地质与勘探,2013,49(1):99-112.
- Hu Q Q,Wang Y T,Wang R T,et al.Geological characteristics and genesis of the Bafangshan-Erlihe Pb-Zn (Cu) deposit in the Fengxian-Taibai ore concentration area,West Qinling[J].Geology and Exploration,2013,49(1):99-112.

- [26] Hu Q Q, Wang Y T, Mao J W, et al. Genesis of the Bafangshan-Erlihe Zn-Pb-Cu deposit in the Fengxian-Taibai ore cluster, west Qinling, China: Evidence from ore geology and ore-forming fluids [J]. *Ore Geology Reviews* 2020, 126(0): 103734.
- [27] 张革利, 田涛, 王瑞廷, 等. 凤太矿集区东塘子铅锌矿床 S、Pb 同位素组成对成矿物质来源的示踪 [J]. *中国地质*, 2020, 47(2): 472-484.
- Zhang G L, Tian T, Wang R T, et al. S, Pb isotopic composition of the Dongtangzi Pb-Zn deposit in the Fengtai ore concentration area of Shaanxi Province for tracing sources of ore-forming materials [J]. *Geology in China* 2020, 47(2): 472-484.
- [28] 石永红, 王永, 陈柏林, 等. 西秦岭凤太矿集区铅锌矿床硅钙面控矿作用——以铅铜山铅锌矿床为例 [J]. *中国地质*, 2022, 49(1): 226-240.
- Shi Y H, Wang Y, Chen B L, et al. Characteristics of silicon-calcium surface ore-controlling in Fengtai ore-concentration areas, West Qinling Mountains: Examples from Qiangongshan Pb-Zn deposit [J]. *Geology in China* 2022, 49(1): 226-240.
- [29] 张长年, 陈丹玲. 八卦庙金矿成矿物理化学条件研究 [J]. *西北大学学报: 自然科学版*, 1993, 23(2): 141-149.
- Zhang C N, Chen D L. An analysis of physical-chemical condition of Baguamiao gold deposit [J]. *Journal of Northwest University: Natural Science Edition*, 1993, 23(2): 141-149.
- [30] 钟建华, 张国伟. 陕西凤县特大型金矿的成因研究 [J]. *地质学报*, 1997, 71(2): 150-160.
- Zhong J H, Zhang G W. On the genesis of the super-large gold deposit in Fengxian County, Shaanxi Province [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1997, 71(2): 150-160.
- [31] 王学明, 汪东波, 邵世才, 等. 陕西八卦庙金矿钠长石的成因 [J]. *矿床地质*, 2001, 20(3): 223-228.
- Wang X M, Wang D B, Shao S C, et al. The genesis of albite in the Baguamiao gold deposit, Shaanxi Province [J]. *Mineral Deposits*, 2001, 20(3): 223-228.
- [32] 冯建忠, 汪东波, 王学明, 等. 陕西凤县八卦庙超大型金矿床成矿地质特征及成矿作用 [J]. *地质学报*, 2003, 77(3): 387-398.
- Feng J Z, Wang D B, Wang X M, et al. Geology and metallogenesis of the Baguamiao giant gold deposit in Fengxian, Shaanxi Province [J]. *Acta Geological Sinica* 2003, 77(3): 387-398.
- [33] 韦龙明, 林锦富, 吴烈善. 凤县八卦庙特大型金矿热水沉积岩的地质地球化学特征 [J]. *地质学报*, 2004, 78(6): 829-835.
- Wei L M, Lin J F, Wu L S. Geological and geochemical characteristics of the hydrothermal sediments in the Baguamiao gold deposit [J]. *Acta Geological Sinica* 2004, 78(6): 829-835.
- [34] 张复新, 季军良, 龙灵利, 等. 南秦岭卡林型—似卡林型金矿床综合地质地球化学特征 [J]. *地质论评*, 2001, 47(5): 492-499.
- Zhang F X, Ji J L, Long L L, et al. Comparative features of Carlin-Para-Carlin type gold deposits in the South Qinling and gold deposits in other area [J]. *Geological Review* 2000, 47(5): 492-499.
- [35] 陈衍景, 张静, 张复新, 等. 西秦岭地区卡林—类卡林型金矿床及其成矿时间、构造背景和模式 [J]. *地质论评*, 2004, 50(2): 134-152.
- Chen Y J, Zhang J, Zhang F X, et al. Carlin and Carlin-like gold deposits in Western Qinling Mountains and their metallogenic time, tectonic setting and model [J]. *Geological Review* 2004, 50(2): 134-152.
- [36] Mao J W, Qiu Y M, Goldfarb R J, et al. Geology, distribution, and classification of gold deposits in the western Qinling belt, central China [J]. *Mineralium Deposita* 2002, 37(3/4): 352-377.
- [37] 王义天, 李霞, 王瑞廷, 等. 陕西凤太矿集区丝毛岭金矿床成矿时代的 Ar-Ar 年龄证据 [J]. *地球科学与环境学报*, 2014, 36(3): 61-72.
- Wang Y T, Li X, Wang R T, et al. Evidence of Ar-Ar age for the metallogenic epoch of Simaoling gold deposit in Fengtai ore cluster of Shaanxi Province [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment* 2014, 36(3): 61-72.
- [38] 王义天, 陈绍聪, 胡乔青, 等. 陕西凤太矿集区多金属成矿作用的构造控制 [J]. *岩石学报*, 2018, 34(7): 1959-1976.
- Wang Y T, Chen S C, Hu Q Q, et al. Tectonic controls on polymetallic mineralization in the Fengxian-Taibai ore cluster zone, Western Qinling, Shaanxi Province [J]. *Acta Petrologica Sinica* 2018, 34(7): 1959-1976.
- [39] Liu J J, Liu C H, Carranza E J M, et al. Geological characteristics and ore-forming process of the gold deposits in the western Qinling region, China [J]. *Journal of Asian Earth Science* 2015, 103: 40-69.
- [40] Ma J, Lyu X B, Li S, et al. The ca.230 Ma gold mineralization in the Fengtai Basin, Western Qinling orogen and its implications for ore genesis and geodynamic setting: A case study of the Matigou gold deposit [J]. *Ore Geology Reviews* 2021, 138: 1-16.
- [41] Wang Y T, Mao J W, Zhang J, et al. Geochronological constraints on the Baguamiao gold deposit, West Qinling orogen, central China: Implications for ore genesis and geodynamic setting [J]. *Ore Geology Reviews* 2020, 122: 1-12.
- [42] 王颖维, 赵端昌, 杜彪, 等. 陕西凤太矿集区典型金矿地质特征及其成矿规律 [J]. *中国地质调查*, 2022, 9(2): 63-72.
- Wang Y W, Zhao D C, Du B, et al. Geological characteristics and metallogenic regularity of typical gold deposits in Fengtai ore concentration area, Shaanxi Province [J]. *Geological Survey of China*, 2022, 9(2): 63-72.
- [43] 刘协鲁, 王义天, 胡乔青, 等. 陕西省凤太矿集区柴蚂金矿床碳酸盐矿物的 Sm-Nd 同位素测年及意义 [J]. *岩石学报*, 2014, 30(1): 271-280.
- Liu X L, Wang Y T, Hu Q Q, et al. Sm-Nd isotopic dating of carbonate minerals from the Chaima gold deposit in the Fengtai ore concentration area, Shaanxi Province and its implications [J]. *Acta Petrologica Sinica* 2014, 30(1): 271-280.
- [44] 王备战, 王瑞廷, 王宏宇, 等. 陕西凤太矿集区深部铅锌矿产资源潜力及地球物理找矿方向 [J]. *地球科学与环境学报*, 2020, 42(6): 801-818.
- Wang B Z, Wang R T, Wang H Y, et al. Potential and geophysical prospecting direction of Pb-Zn mineral resources in the deep area of Fengtai ore-gathering area, Shaanxi, China [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment* 2020, 42(6): 801-818.
- [45] 范剑, 邱小波, 李毅, 等. 西秦岭国安寺—白杨沟地区高精度磁测异常特征及找矿远景分析 [J]. *地球物理学进展*, 2017, 32(6): 2436-2443.

- Fan J ,Qiu X B ,Li Y ,et al.Characteristics of ground magnetic anomalies and exploration perspective analysis in Guo' an temple-Baiyanggou area of west Qinling[J].Progress in Geophysics 2017 , 32(6) : 2436-2443.
- [46] Chen S C ,Wang Y T ,Yu J J ,et al.Petrogenesis of Triassic granitoids in the Fengtai ore cluster ,Western Qinling Orogen ,central China: Implications for tectonic evolution and polymetallic mineralization[J].Ore Geology Reviews 2020 ,123: 1-21.
- [47] 高卫宏 ,王瑞廷 ,李青锋 ,等.西秦岭凤太矿集区西部铅锌成矿特征及找矿方向[J].矿产与地质 2016 ,30(2) : 227-233.
- Gao W H ,Wang R T ,Li Q F ,et al.Metallogenic characteristics and prospecting direction of Pb-Zn deposits in the western part of Fengtai ore-concentrated area in West Qinling [J]. Mineral Resources and Geology 2016 ,30(2) : 227-233.
- [48] 吴建阳 ,张均 ,江满容 ,等.陕西凤太地区丝毛岭金矿地质特征及找矿远景[J].地质找矿论丛 2011 ,26(2) : 182-187.
- Wu J Y ,Zhang J ,Jiang M R ,et al.Geological characteristics and prospecting potential of Simaoling gold deposit in Fengtai county , Shaanxi Province [J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research 2011 ,26(2) : 182-187.

Aerogeophysical anomalies and prospecting direction in the Fengtai ore concentration area

YANG Hai^{1 2} , XU Xue-Yi^{1 3} , XIONG Sheng-Qing¹ , YANG Xue¹ ,
GAO Wei-Hong⁴ , FAN Zheng-Guo¹ , JIA Zhi-Ye¹

(1. China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Natural Resources , Beijing 100083 , China; 2. Institute of Geology and Geophysics , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100029 , China; 3. China Geological Survey , Beijing 100037 , China; 4. No. 717 Geological Party , Northwest Mining and Geological Exploration Bureau for Nonferrous Metals , Baoji 721015 , China)

Abstract: The Fengtai ore concentration area is an important producing area of plumbum-zinc and gold ores in the middle of the Qinling orogenic belt. It hosts many large to super-large deposits , such as Qiandongshan-Dongtangzi , Bafangshan-Erlihe , Baguamiao , and Shuangwang deposits. With the exploitation proceeding , the reserves of these deposits have decreased significantly , and the ore prospecting in these deposits has shifted from the surface to the deep part. However , the geophysical fields in the deposits are yet to be ascertained , severely restricting research on the metallogenic regularity of the deposits and the ore prospecting and exploration in the peripheral zones. Based on the latest 1:50 000 aeromagnetic and airborne radioactivity survey data , as well as gravity data , this study investigated the multi-source geophysical fields on the scales of the region , the ore concentration area , and deposits , aiming to summarize the distribution patterns of geophysical anomalies of different scales and provide evidence for research on metallogenic regularity and prospecting prediction. The results show that the Fengtai and the Xicheng ore concentration areas , with similar magnetic structures , are separated by the zone with strong magnetic anomalies caused by the crystalline basement of the Huicheng Basin. The first vertical derivative of gravity reveals that the Fengtai and Xicheng ore concentration areas have density structures similar to the Huicheng Basin. It can be inferred that the shallow part is a unified basin and that a large prospecting space exists between the two ore concentration areas. Many NW-trending linear magnetic anomaly zones occur in the Fengtai ore concentration area. Their locations are highly consistent with those of fault structures , and they were offset by NE-trending structures due to late transformation. The second vertical derivative of gravity reveals that many intermediate-acid intrusive stocks or veins have developed in the deep part of the Fengtai ore concentration area. Structural boundaries can be effectively identified based on the first vertical derivative , X-directional derivative , and wavelet transform of aeromagnetic data. Furthermore , ore bodies are mostly distributed in the NW direction along the tectonic belt. All these will play an important role in guiding ore prospecting and exploration in the Fengtai ore concentration area.

Key words: Fengtai ore concentration area; aeromagnetic anomaly; airborne radioactivity anomaly; multi-source geophysics; prospecting direction

(本文编辑: 王萌)